

# 通勤交通の出発時刻分布の推定法\*

柳沢 吉保\*\*・飯田 恭敬\*\*\*・内田 敬\*\*\*\*

## The Estimation of the Departure Time Distribution in the Morning Commute

by Yoshiyasu YANAGISAWA, Yasunori IIDA and Takashi UCHIDA

The purpose of this paper is to estimate the departure time distribution in the morning commute by means of the stochastic equilibrium model. The utility function of the morning commutes are expressed as a linear combination of the travel time, schedule delay, lateness in arrival at work, tolls, and congestion in a train. The departure time choice probability are described by a nested logit model. The model is used to study the impacts of changes in parameters of the utility function, tolls, capacity in a train, and flexibility of work start time.

### 1. 概 要

朝の通勤交通について考えると、各通勤者の勤務する会社には仕事開始時刻が存在するため、通勤者はこれに間に合うように居住地を出発する。そのため各会社の仕事開始時刻が同一の場合、通勤者はほぼ同じ時刻に一齐に居住地を出発することになり、企業数の多い都心付近の道路では交通量が集中し、渋滞を引き起こすことになる。これを解決する1つの方法として、会社の始業時刻を変更して、各通勤者の出発時刻分布をずらし、道路上の交通量ピークを低くすることが考えられる。そのため、それらの政策問題を立案するためのモデルを作成するに当たり、各経路の交通量を従来の研究のように一定とした静的問題として取り扱うことができない。そこで、仕事開始時刻や到着指定時刻が存在する場合の通勤者の通勤挙動を分析し、どのような出発分布が形成され、経路上の交通量が時間を追ってどのように変化するか明らかにしなければならない。

出発時刻分布の推定に関する従来の研究としては、主に以下のものがある。

(1) HENDRICKSON<sup>1)</sup>は通勤者の効用をボトルネックでの待ち時間、到着してから仕事開始までの到着余裕時間、また遅刻した場合のペナルティーからなるとして、この効用関数値がすべての通勤者について一定でまた最小となるようなボトルネックへの到着時刻を求めている。ただし、そこでは1 OD 1経路でしか厳密解が求められない。また必ず待ち行列ができるピーク時間帯にしか適用できず、全通勤時間帯には適用できないため、現実的ではない。

\* 平成2年11月土木計画学研究講演会にて発表

\*\* 土木工学科 助手

\*\*\* 京都大学工学部 教授

\*\*\*\* 京都大学工学部 助手

原稿受付

(2) BEN-AKIVA<sup>2)</sup>は効用最大化理論により出発時刻を求めている。ここでは上述の効用関数を用いてロジットモデルにより出発時刻を求めており、個々人の価値判断も考慮に入れているため現実的であり、また複数経路への適用も可能である。

(3) HALL<sup>3)</sup>は所要時間の不確定性を考慮して、所要時間の変動が正規分布に従うと仮定し、遅刻確率と出発から仕事開始までの実旅行時間とのトレードオフを考慮して、その和が最小となる出発時刻を求めている。これはドライバーの知覚する所要時間を推定することが難しいことと、通勤者集団の出発時刻分布を求めることが困難である。

本研究では通勤者集団の出発時刻選択行動を容易に扱うことのできる BEN-AKIVA の方法を用い、新たに効用関数の日々の変動も考慮にいった動的均衡モデルを提案し、多経路多機関の場合の出発時刻分布を求めるとともに効用関数のパラメータによって出発挙動がどのように変化するかについても考察を行なう。

## 2. モデルの定式化

### 2.1 出発時刻・経路選択の同時推定法

通勤者は毎日起こす通勤行動において様々な出発時刻、経路そして機関を選択するが、その通勤行動により得られる効用関数については以下のように表わす。

$$U_i(r, t_s) = V_i(r, t_s) + \mu_i \varepsilon(r, t_s) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- $U_i(r, t_s)$  : 効用関数
- $V_i(r, t_s)$  : 効用関数の確定項
- $\varepsilon(r, t_s)$  : 効用関数の不確定項
- $\mu$  : スケールパラメータ
- $i$  : OD ペア
- $r$  : 経路
- $t_s$  : 出発時刻

ただし、出発時刻  $t_s$  については計算の容易さより、ある時間間隔をもたせ出発時刻を離散的に扱うものとする。ある OD ペアの複数ある経路は同一の機関（交通手段）、あるいはいくつかの機関で構成されている図-2.1のような場合や1つの経路に複数の交通機関が存在する場合が考えられる。

ここで出発時刻  $t_s$ 、機関あるいは経路  $r$  を選択する確率  $P(r, t_s)$  について考えると、個々の行動は HEN-DRICKSON のように必ずしも常に合理的選択行動に厳密に従うとは限らず、また効用関数の知覚に対しても同じ価値判断を持っているとはかぎらない。そこで、効用最大化理論によるロジットモデルを適用して、選択確率  $P(r, t_s)$  を求めることにする。選択確率  $P(r, t_s)$  についてまずは、式(2)のように  $t_s$  が

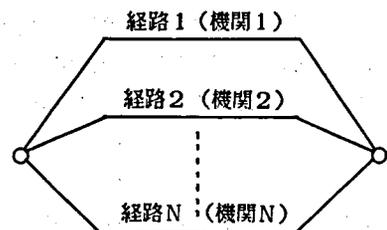


図-2.1 経路または機関（通勤手段）の構成

所与の時、選択肢  $r$  を選ぶ条件付き確率  $P(r|t_s)$  と  $t_s$  を選択する確率  $P(t_s)$  との積による同

時確率と考えられるため、

$$P_i(r, t_s) = P_i(r|t_s) \cdot P_i(t_s) \dots\dots\dots(2)$$

ネスティッドロジットモデルが適用できる<sup>3)</sup>。(2)式について、その選択段階を考えると図-2.2のように、まずある効用を最大にするような出発時刻を選び、出発時刻が決まったら、その出発時刻での最短経路を選ぶ。

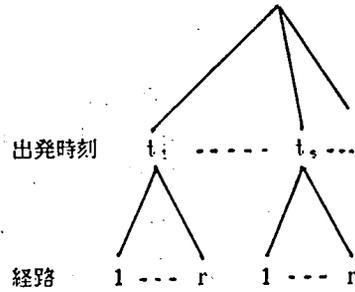


図-2.2 選択段階

まず選択枝  $r$  を選ぶ条件付き確率  $P(r|t_s)$  について考えてみる。このときの効用関数を式(1)と表すと、確率  $P_i(r|t_s)$  は

$$\begin{aligned} P_i(r|t_s) &= \frac{\exp [V_i(r, t_s)/\mu_{1i}]}{\sum_j \exp [V_i(j, t_s)/\mu_{1i}]} \\ &= \frac{\exp [V_i(r, t_s)/\mu_{1i}]}{\exp [V_i(*, t_s)/\mu_{1i}]} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで

$$V_i(*, t_s) = \mu_{1i} \ln \sum_j \exp [V_i(j, t_s)/\mu_{1i}] \dots\dots\dots(4)$$

$\mu_{1i}$  : 経路選択に関するスケールパラメータ

となり、式(4)は時刻  $t_s$  に出発した場合の選択可能経路の最大効用の平均値となる。

次に、出発時刻  $t_s$  を選ぶ確率  $P(t_s)$  について考えてみる。この場合の効用関数については式(4)を用いて、

$$U_i(*, t_s) = V_i(*, t_s) + \mu_{2i} \delta(*, t_s) \dots\dots\dots(5)$$

と表すと、

$$\begin{aligned} P_i(t_s) &= \frac{\exp [V_i(*, t_s)/\mu_{2i}]}{\sum_u \exp [V_i(*, u)/\mu_{2i}]} \\ &= \frac{\exp [V_i(*, t_s)/\mu_{2i}]}{\exp [V_i(*, *)/\mu_{2i}]} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここで

$$V_i(*, *) = \mu_{2i} \ln \sum_u \exp [V_i(*, u)/\mu_{2i}] \dots\dots\dots(7)$$

$\mu_{2i}$  : 出発時刻選択に関するスケールパラメータ

となり、選択可能な時刻と経路の最大効用の平均値となる。よって、同時選択確率  $P_i(r, t_s)$  は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P_i(r, t_s) &= P_i(r|t_s) \cdot P_i(t_s) \\ &= \frac{\exp [V_i(r, t_s)/\mu_{1i}]}{\exp [V_i(*, t_s)/\mu_{1i}]} \times \frac{\exp [V_i(*, t_s)/\mu_{2i}]}{\exp [V_i(*, *)/\mu_{2i}]} \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

よって時刻  $t_s$ 、経路  $r$  を選択する通勤者の需要量  $X_i(r, t_s)$  は、対象とする通勤時間帯の総需要量を  $X$  とすると

$$X_i(r, t_s) = X \cdot P_i(r, t_s) \dots\dots\dots(9)$$

により求めることができる。

ただし、ここでの同時選択確率は、はじめに出発時刻を選択し、次の段階で経路を選ぶ式(2)で表したが、逆にまず第1段階で経路を選び、第2段階で出発時刻を選ぶ場合も考えられ、この場合の同時選択確率は

$$P_i(t_s, r) = P_i(t_s | r) \cdot P_i(r) \dots\dots\dots(10)$$

と表すことができる。

## 2.2 効用関数の動的均衡モデル

ここでは日々の通勤経験による効用関数の変動について考える。

ある日の通勤で得られた効用によって次の日の出発時刻、経路選択を行った場合、効用が大きい選択肢に需要が集中し過ぎ、その選択肢は次の日には効用が低下する。つまり、このような前日だけの経験による効用は感度が非常に敏感で選択行動が収束しにくい。しかし、実際の通勤行動では繰り返し行動によって得られた過去の効用も考慮に入れて選択行動を行うため、かなり収束した状態になっているものと思われる。そのことに鑑み、本研究でも過去に経験した効用によって新たに効用を更新する方法について理論的に検討を行なう。

そこで、現時点で観測された効用とそれ以前の効用をそれぞれ重み付けし、その単純な和により表わす。ただしここでは、走行経験により蓄積された情報によって、重み係数は更新されない。

$$\begin{aligned} V_i(r, t_s, n) &= \alpha R_i(r, t_s, n) + (1-\alpha) V_i(r, t_s, n-1) \\ &= V_i(r, t_s, n-1) + \alpha \times (R_i(r, t_s, n) - V_i(r, t_s, n-1)) \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

ここで、

- $R_i(r, t_s, n)$  : 第  $n$  日に観測された効用
- $\alpha$  : 重み係数
- $n$  : 第  $n$  日

また、通勤行動のように繰り返し経験する行為については、経験して日が浅い場合と、かなり経験した場合とではそれまでに経験した効用の重みが違ってくる。そこで、過去に経験した効用により重み係数  $\alpha$  が確率的に変動するものとして、ベイズの定理を用いて、新しいデータを補うことにより、既存の確率値を修正する方法も考えられるが、ここでは省略する。

## 2.3 通勤者の効用関数

ここでは到着指定時刻があり、時刻  $t_s$  に出発し、経路  $k$  を利用する通勤者の効用について考える。朝の通勤交通を考えた場合、勤務地や乗継ぎ場所に到着指定時刻が存在するため、それらを考慮に入れた出発時刻や経路選択を行わなければならない。到着指定時刻が存在する場合の、出発時刻・経路選択行動について、まず考えられる重要な要因は、出発してから仕事開始までに消費する時間(実消費時間)である。通勤者は通常この時間をできる限り小さくしようとする。ただしあまり短くしようとして、遅めに出発すると遅刻してしまう。ま

た遅刻をおそれて早めの出発時刻を選ぶと、早く目的地に到着してしまい、仕事が始されるまでの待ち時間が長くなり、無駄な時間消費をしてしまう。そのほかに、交通混雑により受けるストレスについても選択行動において重要なファクターとなるであろう。これらの事を考慮にいれて一般街路、高速自動車道、鉄道を利用した場合の効用関数の構築を行なう。

(1) 一般街路利用者の効用関数

一般街路利用者が通勤行動により消費するコストについては、出発から勤務先までにかかった所要時間、到着から仕事開始時刻  $t_d$  までの到着余裕時間、また遅刻してしまった場合の罰金も考慮にいれて、それらのトレードオフにより次のような効用関数が考えられる<sup>1)</sup>。

$$R_i(r, t_s, n) = d_i - at_v(r, t_s) - C_p(r, t_s) \dots\dots\dots(12)$$

$R_i(r, t_s, n)$  : 時刻  $t_s$  に出発し、一般街路の経路  $r$  を利用する通勤者の効用

$t_v(r, t_s)$  : 家から通勤先までにかかった所要時間

$C_p(r, t_s)$  : 到着余裕時間、または遅刻時間に関する消費コストで以下のように定義する。

$$C_p(r, t_s) = \begin{cases} b(t_d - t_a(t_s)) : t_d \geq t_a(t_s) \\ c(t_d - t_a(t_s)) : t_d < t_a(t_s) \end{cases}$$

$a, b, c$  : 時間価値に関するパラメータ

$t_a(t_s)$  : 時刻  $t_s$  に出発した場合の通務先に到着する時刻。

条件について  $t_d > t_a(t_s)$  は遅刻しなかった場合であり、 $t_d < t_a(t_s)$  は遅刻した場合を表している。

所要時間コストと到着余裕時間コストの和は次のように実旅行時間と運転コストの和に書き直すことができる。

$$\begin{aligned} at_v(r, t_s) + b(t_d - t_a(t_s)) \\ = b(t_d - t_s) + (a - b)t_v(r, t_s) \end{aligned}$$

ここで  $(a - b)$  が運転コストとなる。

(2) 高速道利用者の効用関数

高速自動車道利用者の効用関数は一般街路と比較し、利用料金が必要なことである。よって、次のように表すことができる。

$$R_i(r, t_s, n) = d_i - at_v(r, t_s) - C_p(r, t_s) - F(r) \dots\dots\dots(13)$$

$F(r)$  : 経路  $r$  を利用する場合の料金に関するパラメータ

(3) 鉄道利用者の効用関数

鉄道利用者が消費するコストについては、駅出発時刻  $t_s$  から仕事開始時刻までの実旅行時間、乗車料金、車内定員をオーバーした場合の不快感を考慮にいれ、次のような効用関数を採用した。

$$R_i(r, t_s, n) = d_i - F(r) - b(t_d - t_s) - G_c \dots\dots\dots(14)$$

$F(r)$  : 乗車料金に関するパラメータ

$t_s$  : 列車出発時刻

$G_c$ : 車内の混雑に関する不効用。定員を  $T$ , 利用者を  $X_i(r, t_s, n)$  とした場合、以下のように定義する。

$$G_c = e(X_i(r, t_s, n)/T)^2$$

$e$ : パラメータ

(14)式の第3項は実旅行時間を表している。また、所要時間については一定とした。

なお、 $t_s$ については同一経路で利用機関が複数存在する場合、乗継ぎに必要な時間も考慮にいったターミナルへの到着時刻とする。

## 2.4 計算アルゴリズム

2.1, 2.2, 2.3により、各経路の出発時刻分布を求めるためのアルゴリズムを示す。

step. 1:  $n=1$ として計算を開始。

step. 2: 各出発時刻、経路に適当な需要量の初期値  $X_i(r, t_s, n)$ を与える。

step. 3: 所要時間関数により各経路の所要時間を求める。

step. 4: 各出発時刻、経路の利用者の観測効用  $R_i(r, t_s, n)$ を(12)~(14)式を用いて求める。

step. 5: (11)式により効用関数値  $V_i(r, t_s, n)$ を求める。

step. 6: 各出発時刻、経路選択確率  $P_i(r, t_s, n)$ を step.5で求めた効用関数値を用いて(8)式により求める。

step. 7: 各出発時刻、経路の需要量  $X_i(r, t_s, n+1)$ を(9)式を用いて求める。

step. 8:  $|X_i(r, t_s, n+1) - X_i(r, t_s, n)| < \delta$ であれば計算を終了。そうでなければ  $n=n+1$ として step. 3へ戻る。

## 3. 簡単な数値計算例

図-3.1のような1OD3経路の道路網について計算を行なう。

経路1は一般道路。経路2は高速自動車道。経路3は鉄道とする。

通勤時間帯は7:00から9:30までとし、微小時間間隔は10分を単位とする。企業は複数あるが、仕事開始時刻はすべて8:30とし、その需要交通量は243とする。一般自動車道の所要時間関数は

$$t_v(1, t_s) = 0.019X(1, t_s) + 0.009X(1, t_s-1) + 3.5$$

高速自動車道の所要時間は

$$t_v(2, t_s) = 0.0095X(2, t_s) + 0.0045X(2, t_s-1) + 1.75$$

1.75

列車の所要時間は

$$t_v(3, t_s) = 1.5 \quad (15分)$$

と表わす。

列車の出発時刻は7:10, 7:30, 7:50, 8:00, 8:10, 8:20, とし、また定員についてはすべての列車とも15とした。

簡単のため、(8)式のスケールパラメータは1とし、(11)式の重み係数  $\alpha$  は0.5とし、変動しないものとして計算を行った。これらの数値は先験的に与えた。

数値計算については効用関数のパラメータを変化させた以下のケースで行なう。

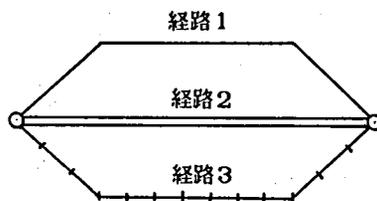


図-3.1 数値計算例の経路

(1) ケース 1

効用関数のパラメータを  $a=0.2$ ,  $b=0.2$ ,  $c=0.5$ ,  $d=5$ ,  $e=0.9$ ,  $F(1)=0.7$ ,  $F(2)=0.5$  とする。このケースでは所要時間と到着余裕時間の時間価値を同じとした。このときの出発時刻分布を図-3.2に示す。

この図より一般道での需要ピークは仕事開始時刻の8:30より40分前に起きているが、一般道よりも所要時間の短い高速自動車道では20分前の8:10に需要がピークとなっている。高速道よりもやや所要時間の短い鉄道利用者の

ピークは8:10となっているが、これは1単位時間後の8:20に出発した場合、多少遅刻のペナルティーがあるためである。また所要時間の短い高速道と較べ一般道の需要が多いが、これは高速道の通行料金によって需要が抑えられているためであり、高速道の通行料金よりも乗車料金の低い鉄道は出発時刻が決っており、どの出発時刻でも利用できるわけではないので累積需要が一番小さくなる。なお、このケースにおける一般道の総走行時間は394.7、高速道は158.7となった。

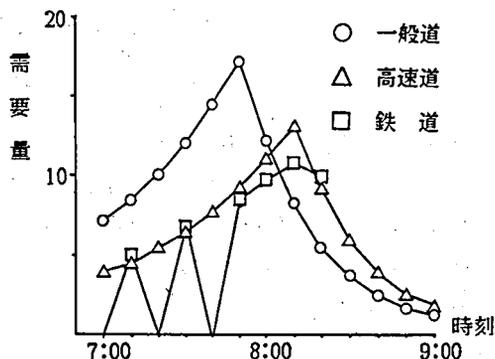


図-3.2 ケース 1 の出発時刻分布 (需要量)

(2) ケース 2

効用関数のパラメータを  $a=0.2$ ,  $b=0.2$ ,  $c=0.5$ ,  $d=5$ ,  $e=0.9$ ,  $F(1)=0.1$ ,  $F(2)=0.5$  とする。これは高速道の通行料金を下げるか、あるいは通行料金に対する価値が低い場合である。

図-3.2と比較すると、一般道と鉄道の利用者が減少し、高速道の需要が非常に多くなっていることがわかる。これは通行料金による不効用が低いことと、所要時間が短く、実旅行時間の不効用を小さくすることのできるためである。そのため利用者全体の動きを見ると、ケース1と比較し出発時刻は多少遅れている。また、一般道の需要が減少したことから総走行時間は312.4と大幅に減少した。

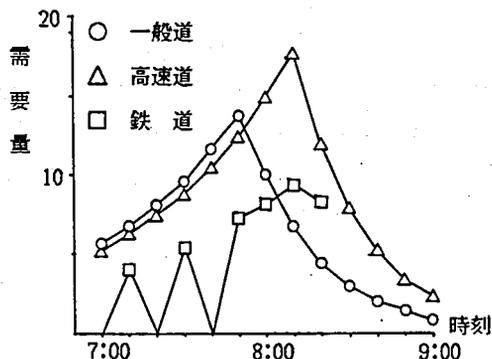


図-3.3 ケース 2 の出発時刻分布 (需要量)

(3) ケース 3

効用関数のパラメータを  $a=0.2$ ,  $b=0.2$ ,  $c=0.5$ ,  $d=5$ ,  $e=0.9$ ,  $F(1)=0.7$ ,  $F(2)=0.1$  とする。これは鉄道の乗車料金を下げた場合である。

乗車料金が下げられた結果、ケース1と比較し鉄道利用者が各出発時刻で増えている。

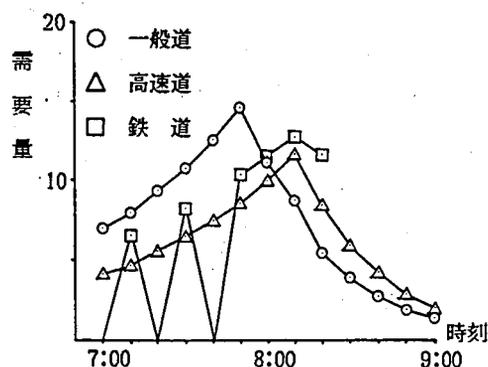


図-3.4 ケース 3 の出発時刻分布 (需要量)

一般道路利用者が鉄道利用に流れたため総走行時間は359.6と減少している。

#### 4. 結 論

機関別の効用関数を用い、ネスティッドロジットモデルにより、通勤者の出発時刻、経路（機関）選択分布を容易に算出することができることを示した。また、パラメータを変え、それともなう出発挙動の変化を分析することにより、有効な政策手段を見いだすことができるのではないかと思われる。

本研究の数値計算例で用いたパラメータでは高速道や鉄道の料金を低くした場合に多くの利用者がそちらに流れ、一般道の混雑緩和効果が大きかったことがわかった。また、所要時間価値が大きい住民が多い地域では、混雑を避けるように出発時刻を選択するため、交通混雑が起こりにくいことがわかった。ただし、これらの特性を明確に把握するためには、さらにケースを増やしシミュレーションを行わなければならない。

本研究を交通運用面で考えた場合その目的は、仕事開始時刻をずらし、ピーク需要を下げる時差出勤や公共交通機関のサービスを向上させ通勤者の各通勤手段への適正分担をはかる問題に適用し、交通混雑を緩和させることにあるが、ここではそのための第1段階として仕事開始時刻が存在する場合の通勤者の出発挙動の分析を行ったものである。この意味で本研究は、まだ初期段階にあり本研究の中で重要な位置を占める出発時刻分布の推定法についても、いくつかの課題が残されている。

今後、検討しなければならない点については以下の通りである。

- (1) ネスティッドロジットモデルで、まず経路から選択し、ついで出発時刻を選択する方法も検討し、式(10)との関係についても分析を行なう。
- (2) スケールパラメータの値についても考慮し、数値計算のケースを増やす。
- (3) 仕事開始時刻を複数にして、その時刻を動かしたときの交通挙動特性を分析する。
- (4) 式(11)について、重み係数が更新される場合についてもシミュレーションを行い、出発時刻・経路選択行動の収束性についても分析を行う。
- (5) 時々刻々と変化するリンク上の交通量を扱うことのできるボックス型モデル等<sup>4)</sup>により多経路多ODに適用できるモデルの開発を行なう。

#### 参 考 文 献

- 1) C. HENDRICKSON, G. KOCUR: Schedule Delay and Departure Time Decision in a Deterministic Model, Transportation Science Vol. 15, No. 1, February, 1981
- 2) Hall, R. W.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, Trans. Res. -B Vol. 17B, No. 4, pp. 275-290, 1983.
- 3) BEN-AKIVA: DYNAMIC MODEL OF PEAK PERIOD TRAFFIC WITH ELASTIC ARRIVAL RATES, Trans. Sci. Vol. 20, No. 2, pp. 164-181, 1986.
- 4) 鷹尾和亨: 経路選択シミュレーションによる動的交通量配分, 土木学会第45回年次学術講演会 IV, 1990年10月